饲粮 n-6/n-3 多不饱和脂肪酸比值对冬毛期北极狐生长性能及肝脏脂肪酸代谢相关蛋白基因表达的影响[1]

钟 伟 张 婷 罗 靖 岳志刚 刘学庆 樊燕燕 孙皓然 孙旭阳 李光玉*

（中国农业科学院特产研究所，吉林省特种经济动物分子生物学省部共建实验室，长春 130112）

摘 要：本试验旨在研究饲粮 n-6/n-3 多不饱和脂肪酸(PUFA)比值对冬毛期北极狐生长性能、肝脏脂肪酸组成及肝脏型脂肪酸结合蛋白(*L-FABP*)和脂肪酸转运蛋白(*FATP*)基因表达的影响。试验选取 48 只 157 日龄、平均体重为（5 658±47） g 的健康雄性北极狐，随机分成 4 组，每组 12 个重复，每个重复 1 只。Ⅰ组饲粮中添加 12.00%鱼油和 2.00%豆油，n-6/n-3 PUFA 比值为 3.00；Ⅱ组饲粮中添加 9.38%玉米油和 4.62%豆油，n-6/n-3 PUFA 比值为 18.03；Ⅲ组饲粮中添加 12.00%玉米油和 2.00%豆油，n-6/n-3 PUFA 比值为 40.83；Ⅳ组饲粮中添加 1.50%鱼油和 12.50%玉米油，n-6/n-3 PUFA 比值为 136.36。各组饲粮除油脂组成和配比不同外，其他原料一致。预试期 7 d，正试期 40 d。结果表明：1）饲粮 n-6/n-3 PUFA 比值对冬毛期北极狐的平均日增重（ADG）、平均日采食量（ADFI）和料重比（F/G）有极显著影响（$P<0.01$）。Ⅰ和Ⅳ组的 ADG 极显著高于Ⅱ和Ⅲ组（$P<0.01$），Ⅰ、Ⅱ和Ⅳ组的 ADFI 极显著高于Ⅲ组（$P<0.01$），Ⅳ组的 F/G 极显著低于Ⅱ和Ⅲ组（$P<0.01$）。2）饲粮 n-6/n-3 PUFA 比值对冬毛期北极狐肝脏单不饱和脂肪酸（MUFA）、PUFA、n-3 PUFA 和 n-6 PUFA 的含量有显著或极显著影响（$P<0.05$ 或 $P<0.01$），对肝脏饱和脂肪酸（SFA）含量无显著影响（$P>0.05$）。Ⅰ和Ⅳ组肝脏 n-3 PUFA 含量极显著高于Ⅱ和Ⅲ组（$P<0.01$），Ⅱ和Ⅲ组肝脏 n-6 PUFA 含量极显著高于Ⅰ和Ⅳ组（$P<0.01$）。3）饲粮 n-6/n-3 PUFA 比值对冬毛期北极狐肝脏 *L-FABP* mRNA 相对表达量无显著影响($P>0.05$)，但极显著影响肝脏 *FATP* mRNA 相对表达量($P<0.01$)。Ⅰ和Ⅳ组肝脏 *FATP* mRNA 相对表达量极显著高于Ⅱ和Ⅲ组($P<0.01$)。由此可见，饲粮添加 1.50%鱼油与 12.50%玉米油的混合油脂，即饲粮 n-6/n-3 PUFA 比值为 136.36 时，上调了肝脏中 *FATP* 基因的表达，增加了肝脏长链脂肪酸的转运及利用效率，促

收稿日期：2016-08-11
基金项目：吉林省自然基金科学项目（20140101033JC）；中国农业科学院创新工程项目
作者简介：钟 伟（1980-），女，吉林永吉人，副研究员，从事特种经济动物营养代谢研究。E-mail： zhongwei8015@163.com
*通信作者：李光玉，研究员，博士生导师，E-mail： tcslgy@126.com

进了冬毛期北极狐的生长。

关键词：n-6/n-3 多不饱和脂肪酸；北极狐；肝脏；脂肪酸；肝脏型脂肪酸结合蛋白；脂肪酸转运蛋白

中图分类号：S816　　　　文献标识码：A　　　　　　文章编号：

多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids，PUFA)，尤其是 n-3 和 n-6 PUFA，对机体脂类代谢、基因表达调控、免疫机能及畜禽产品脂肪酸组成等方面发挥着重要作用[1-2]。由于 n-6 和 n-3 PUFA 在机体内不能相互转化，必须通过饲粮摄取，因此 n-6/n-3 PUFA 比值平衡成为目前最受关注的问题。n-6 和 n-3 PUFA 是动物必需脂肪酸，研究表明饲料中添加 n-6 和 n-3 PUFA 既能满足必需脂肪酸的需要，适宜 n-6/n-3 PUFA 比值能维持机体的生理机能，调节脂质代谢，促进畜禽健康生长[3-7]。毛皮动物体脂肪酸组成与饲粮脂肪酸组成存在一定的对应关系[8-10]，且不同组织中脂肪酸组成有差异[11]。肝脏型脂肪酸结合蛋白（L-FABP）和脂肪酸转运蛋白（FATP）是具有脂肪酸转运作用的 2 种蛋白，L-FABP 是脂肪酸结合蛋白家族（FABPs）的重要成员，FATP 是跨膜转运蛋白超家族（FATPs）中的一员，2 种蛋白均对长链脂肪酸具有高度亲和力，在脂质代谢过程中，对脂肪酸的摄取与转运起着重要作用[12-13]。北极狐(*Alopex lagopus*)，属于食肉目犬科动物，原产于亚洲、欧洲、北美洲北部和接近北冰洋地带，属于世界珍贵的毛皮动物之一。北极狐在耐受脂肪方面与畜禽存在不同[14]，其在脂肪酸利用、转运及沉积方式方面的研究尚未见研究报道。因此，本文旨在通过研究饲粮 n-6/n-3 PUFA 比值对冬毛期北极狐生长性能、肝脏脂肪酸组成、*L-FABP* 和 *FATP* 基因表达的影响，以期为北极狐的生产及脂肪代谢研究提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验动物

试验选用的北极狐是地产芬系北极狐，即引进的芬兰种狐经过多年繁育所形成的地方品种。

1.2　试验设计与试验饲粮

选取 157 日龄 48 只平均体重为（5 658±47） g 的健康生长期雄性北极狐，随机分成 4 组，每组设 12 个重复，每个重复 1 只北极狐。以膨化玉米、豆粕、玉米蛋白粉、干酒糟及其可溶物（DDGS)、鱼粉、肉粉、油等为主要原料，同时添加由矿物质元素、维生素等组

成的营养性添加剂配制成试验饲粮，饲粮中脂肪酸需求量参照 FEDIAF（European Pet Food Industry Federation，2011）[15]，通过改变饲粮中的油脂配比来调配脂肪酸的比例，各组饲粮除油脂组成和配比不同外，其他原料一致。其中，Ⅰ组饲粮中添加 12.00%鱼油和 2.00%豆油，n-6/n-3 PUFA 比值为 3.00；Ⅱ组饲粮中添加 9.38%玉米油和 4.62%豆油，n-6/n-3 PUFA 比值为 18.03；Ⅲ组饲粮中添加 12.00%玉米油和 2.00%豆油，n-6/n-3 PUFA 比值为 40.83；Ⅳ组饲粮中添加 1.50%鱼油和 12.50%玉米油，n-6/n-3 PUFA 比值为 136.36。试验饲粮组成及营养水平、脂肪酸组成分别见表 1 和表 2。

表 1　试验饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of experimental diets (air-dry basis)　　%

项目 Items	组别 Groups			
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
原料 Ingredients				
膨化玉米 Extrusion corn	32.75	32.75	32.75	32.75
豆粕 Soybean meal	12.00	12.00	12.00	12.00
玉米蛋白粉 Corn protein meal	8.00	8.00	8.00	8.00
干酒糟及其可溶物 DDGS	1.55	1.55	1.55	1.55
鱼粉 Fish meal	16.00	16.00	16.00	16.00
肉粉 meat meal	10.00	10.00	10.00	10.00
赖氨酸 Lys	0.80	0.80	0.80	0.80
蛋氨酸 Met	0.40	0.40	0.40	0.40
预混料 Premix1）	1.00	1.00	1.00	1.00
鱼油 Fish oil	12.00			1.50
玉米油 Corn oil	0.00	9.38	12.00	12.5
豆油 Soybean oil	2.00	4.62	2.00	
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	3.00	3.00	3.00	3.00
食盐 NaCl	0.50	0.50	0.50	0.50
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00

营养水平 Nutrient levels[2)]				
代谢能 ME/(MJ/kg)	19.04	19.03	19.14	19.05
粗蛋白质 CP	29.76	29.39	29.82	29.76
粗脂肪 EE	15.50	15.13	15.77	15.09
粗灰分 Ash	9.31	8.82	9.05	8.71
碳水化合物 Carbohydrate	41.43	42.66	41.36	42.44
赖氨酸 Lys	1.41	1.41	1.41	1.41
蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys	1.05	1.05	1.05	1.05
钙 Ca	1.613	1.544	1.504	1.397
磷 P	1.139	1.034	1.103	0.977

1) 每千克预混料含有 One kilogram of premix contained the following：VA 300 000 IU，VD 3 200 000 IU，VE 4 000 mg，VK 350 mg，VB_1 400 mg，VB_2 500 mg，VB_6 200 mg，VB_{12} 4.2 mg，叶酸 folic acid 50 mg，泛酸 pantothenic acid 2 200 mg，生物素 biotin 1 600 mg，氯化胆碱 choline chloride 120 mg，VC 12 000 mg，Fe 4 000 mg，Zn 3 200 mg，Mn 1 600 mg，I 80 mg，Se 12 mg，Cu 500 mg。

2）粗蛋白质、粗脂肪、粗灰分、赖氨酸、蛋氨酸、钙、磷均为测定值，其他为计算值。CP, EE, Ash, Lys, Met, Ca and P were calculated values, while the others were measured values.

表2 试验饲粮脂肪酸组成

Table 2 Fatty acid composition of experimental diets mg/g

脂肪酸	组别 Groups			
Fatty acids	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
C12:0	0.00	0.00	0.00	0.00
C14:0	1.46	0.01	0.00	0.18
C14:1	0.00	0.00	0.00	0.00
C15:0	0.00	0.00	0.00	0.00
C15:1	0.00	0.00	0.00	0.00
C16:0	8.56	4.12	3.37	3.45

C16:1	4.15	0.01	0.00	0.51
C17:0	0.00	0.00	0.00	0.00
C17:1	0.00	0.00	0.00	0.00
C18:0	1.79	1.10	0.76	0.63
C18:1n-9*t*	0.00	0.00	0.00	0.00
C18:1n-9*c*	30.80	22.86	21.80	22.12
C18:2n-6*t*	0.00	0.00	0.00	0.00
C18:2n-6*c*	13.35	73.21	76.36	70.89
C20:0	0.06	0.14	0.14	0.12
C18:3n-6	0.00	0.00	0.00	0.00
C20:1	0.17	0.08	0.09	0.10
C18:3n-3	1.93	4.06	1.86	0.19
C21:0	0.00	0.00	0.00	0.00
C20:2n-6	0.00	0.01	0.00	0.00
C22:0	0.02	0.05	0.02	0.00
C22:1n-9	0.00	0.00	0.00	0.00
C20:3n-3	0.00	0.00	0.00	0.00
C23:0	0.00	0.00	0.00	0.00
C20:4n-6	0.09	0.00	0.00	0.01
C22:2n-6	0.00	0.00	0.00	0.00
C24:0	0.01	0.01	0.01	0.00
C20:5n-3	1.92	0.00	0.00	0.24
C24:1	0.02	0.00	0.00	0.00
C22:6n-3	0.63	0.00	0.00	0.08
SFA	11.90	5.43	4.30	4.38
MUFA	35.14	22.95	21.89	22.73
PUFA	17.92	77.28	78.23	71.41

n-6 PUFA	13.44	73.22	76.36	70.90
n-3 PUFA	4.48	4.06	1.87	0.52
n-6/n-3 PUFA	3.00	18.03	40.83	136.36

SFA为饱和脂肪酸，MUFA为单不饱和脂肪酸，PUFA为多不饱和脂肪酸。表5同。

SFA was saturabilied fatty acids, MUFA was monounsaturated fatty acids, and PUFA was polyunsaturated fatty acids. The same as Table 5.

1.3 饲养管理

本试验在中国农业科学院特产研究所毛皮动物试验基地完成。试验从 2014 年 10 月 13 日开始至 2014 年 12 月 1 日结束，预试期 7 d，正试期 40 d。试验动物单笼饲养，每天 08：00 和 15：00 各饲喂 1 次，自由饮水。

1.4 样品采集

正试期结束后，每组随机选取 7 只北极狐，心脏注射 5 mL 的琥珀乙酰胆碱处死，之后迅速解剖，取肝小叶相同部位约 2 g，用生理盐水冲洗掉血迹，放入冻存管后立即投入液氮中 10 min 以上，之后转入－80 ℃冰箱保存。另取肝脏约 50 g，用生理盐水冲洗掉血迹，放入自封袋，－20 ℃冰箱冷藏待测脂肪酸组成。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 饲粮养分的测定

测定饲粮中干物质、粗蛋白质、粗脂肪、粗灰分、钙、磷含量。干物质含量采用 105 ℃烘干法测定，参照 GB/T 6435—2006；粗蛋白质含量采用凯氏定氮法测定，参照 GB /T 6432—1994；粗脂肪含量采用索氏抽提法测定，参照 GB/T 6433—1994；粗灰分含量采用 550 ℃灼烧法测定，参照 GB/T 6438—1992；钙含量采用乙二胺四乙酸(EDTA)络合滴定法测定，参照 GB/T 6436—1992；磷含量采用钒钼酸铵比色法测定，参照 GB/ T6437—1992；氨基酸含量采用全自动氨基酸分析仪（HITACHI，L-8900，日本）进行测定。

1.4.2 生长性能指标计算

平均日采食量(g/d)=试验期采食量/试验天数；

平均日增重(g/d)=(末重－初重)/试验天数；

料重比=平均日采食量/平均日增重。

1.4.2　饲粮和肝脏脂肪酸组成的测定

脂肪酸前处理采用甲酯化方法，参照 GB/T 21514-2008，测试采用外标法。脂肪酸测定采用气质联用仪（Agilent7890A-7000B），色谱条件：色谱柱为 DB-5MS（30 m×250 μm×0.25 μm）；柱温初始为 55 ℃，保持 2 min，然后以 5 ℃/min 速率升至 200 ℃，保持 1 min，再以 2 ℃/min 速率升至 230 ℃，保持 3 min，再以 5 ℃/min 速率升至 270 ℃，保持 10 min；进样口温度为 250 ℃；载气为氦气（99.999%）1.0 mL/min；进样量为 1 μL；分流比为 10：1。质谱条件：电子轰击离子（EI）源；离子源温度为 230 ℃；电子能量为 70 eV；接口温度为 250℃；扫描质量范围为 50～500 m/z。

1.4.3　肝脏 *L-FABP* 和 *FATP* mRNA 相对表达量的测定

1.4.3.1　总 RNA 提取和 cDNA 的合成

取肝脏样品于液氮中研磨成粉，收集于 1.5 mL 无 RNA 酶 Eppendorf 管中。总 RNA 的提取采用 RNAiso Reagent 试剂盒(TaKaRa 公司)，提取过程参照试剂盒说明书。提取的总 RNA 通过凝胶电泳检测其完整性，并测定总 RNA 在 260 和 280 nm 处的吸光度(OD)值，以检测其纯度。反转录依据试剂盒(TaKaRa 公司)进行，反转录产物于-20 ℃冻存备用。

1.4.3.2　*L-FABP* mRNA 和 *FATP* mRNA 相对表达量的测定

L-FABP 和 *FATP* mRNA 相对表达量的测定采用实时荧光定量 PCR 技术(SYBR Green 染料法，Trans-Start 试剂盒)，以 β-肌动蛋白(β-actin)作为内参基因，引物信息见表 3，引物由上海生工生物工程有限公司合成。采用 20 μL PCR 反应体系：2×Trans Start Top Green qPCR SuperMix 10 μL，上游引物(10 μmol/L) 0.4 μL，下游引物(10 μmol/L)0.4 μL，Passive Reference Dye (50×) 0.4 μL，Rnase Free dH_2O 7.8 μL，cDNA 1 μL。反应程序:预变性，95 ℃ 1 min，1 个循环；PCR 反应 95 ℃，5 s，退火 25 s(具体退火温度见表 3)，共 40 个循环。熔解曲线用于确定扩增产物的特异性，反应程序为:65～95 ℃，每升高 0.5 ℃分析 1 次，95 ℃结束，61 个循环。

表 3　实时荧光定量 PCR 引物序列及参数

Table 3　Primer sequences and parameters for real time qPCR

基因 Genes	引物序列 Primer sequence (5’–3’)	退火温度 Tm/℃	产物大小 Product size/bp

β-肌动蛋白	F:GCTCTCTTCCAGCCTTCCTT	57.0	100
β-actin	R：GGTCCTTGCGGATGTCAA	57.0	
肝脏型脂肪酸结合蛋白	F：ACAGACTTGATGCCTTTG	52.7	185
L-FABP	R：GAAATCGTGCAGAATGG	52.7	
脂肪酸转运蛋白 *FATP*	F:ATCGTGGCTGGTGCTACTCT	57.0	144
	R:ATTGGGTTTCTGGGGTGAAT	57.0	

1.5 数据整理与统计分析

试验数据采用Excel 2003进行整理，采用SPASS 9.13软件中的GLM程序进行统计分析，多重比较采用Duncan氏法进行，其中*P*<0.01为差异极显著，*P*<0.05为差异显著，*P*>0.05为差异不显著，结果以平均值±标准差表示。

2 结 果

2.1 饲粮n-6/n-3 PUFA比值对冬毛期北极狐生长性能的影响

由表 4 可知，饲粮 n-6/n-3 PUFA 比值对冬毛期北极狐 ADG、ADFI 和 F/G 有极显著影响（*P*<0.01）。Ⅰ和Ⅳ组 ADG 极显著高于Ⅱ和Ⅲ组（*P*<0.01），Ⅰ和Ⅳ组间差异不显著（*P*>0.05），Ⅱ和Ⅲ组间差异不显著（*P*>0.05）。Ⅰ、Ⅱ和Ⅳ组的 ADFI 极显著高于Ⅲ组（*P*<0.01），而Ⅰ、Ⅱ和Ⅳ组间差异不显著(*P*>0.05）。Ⅳ组的 F/G 极显著低于Ⅱ和Ⅲ组（*P*<0.01），与Ⅰ组间差异不显著（*P*>0.05），Ⅰ与Ⅳ组间差异不显著（*P*>0.05），Ⅱ与Ⅲ组间差异不显著（*P*>0.05）。

表 4 饲粮 n-6/n-3 PUFA 比值对冬毛期北极狐生长性能的影响

Table 4 Effects of dietary n-6 /n-3 PUFA ratio on growth performance of Arctic foxes during the winter fur-growing period

项目 Items	组别 Groups				*P* 值
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	*P*-value
平均日增重 ADG/(g/d)	30.50±5.23^{Aa}	22.33±5.16^{Bb}	18.00±5.42^{Bb}	36.36±5.50^{Aa}	0.001
平均干物质采食量 ADFI/(g/d)	320.00±2.77^{Aa}	305.19±17.84^{Aa}	276.92±37.56^{Bb}	318.62±3.09^{Aa}	0.002
料重比 F/G	10.82±2.17^{ABab}	13.63±2.82^{Aa}	13.50±1.87^{Aa}	8.53±1.12^{Bb}	0.006

同行数据肩标不同大写字母表示差异极显著（*P*<0.01），不同小写字母表示差异显著（*P*<0.05），相同或无字母表示差异不显著（*P*>0.05）。下表同。

In the same row, values with different capital letter superscripts mean extremely significant difference (*P*<0.01), and with different small letter superscripts mean significant difference (*P*<0.05), while with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference (*P*>0.05). The same as below.

2.2 饲粮n-6/n-3 PUFA比值对北极狐肝脏脂肪酸组成的影响

由表5可知，饲粮n-6/n-3 PUFA比值对肝脏单不饱和脂肪酸（MUFA）、多不饱和脂肪酸（PUFA）、n-3 PUFA和n-6 PUFA的含量有显著或极显著影响（*P*<0.05或*P*<0.01)，对饱和脂肪酸（SFA）含量无显著影响（*P*>0.05）。Ⅰ和Ⅳ组肝脏MUFA含量显著高于III组（*P*<0.05），与Ⅱ组差异不显著（*P*>0.05），Ⅱ和III组间差异不显著（*P*>0.05）；Ⅱ组肝脏PUFA含量显著高于Ⅰ和Ⅳ组（*P*<0.05），与III组差异不显著（*P*>0.05）；Ⅰ和Ⅳ组肝脏n-3 PUFA含量极显著高于Ⅱ和III组（*P*<0.01），Ⅱ组未检出；Ⅱ和III组肝脏n-6 PUFA含量极显著高于Ⅰ和Ⅳ组（*P*<0.01），Ⅱ与III组间、Ⅰ与Ⅳ组间差异不显著（*P*>0.05）。

表 5 饲粮 n-6/n-3 PUFA 比值对冬毛期北极狐肝脏脂肪酸组成的影响（占总脂肪酸的比例）

Table 5 Effects of dietary n-6/n-3 PUFA ratio on liver fatty acid composition of Arctic foxes during the winter fur-growing period （proportion of total fatty acids） %

脂肪酸	组别 Groups				*P* 值
Fatty acids	Ⅰ	Ⅱ	III	Ⅳ	*P*-value
C14:0	0.39±0.12	0.28±0.00	0.42±0.13	0.56±0.00	0.560
C16:0	18.57±3.47	15.67±3.60	15.10±3.80	15.50±1.15	0.260
C16:1	1.38±0.43	0.74±0.06	0.85±0.25	1.64±0.68	0.060
C17:0	0.66±0.08	0.82±0.08	0.72±0.00	0.66±0.08	0.210
C18:0	47.24±2.56	40.70±3.50	46.08±9.23	47.24±2.56	0.370
C18:1n-9*c*	10.79±2.65	10.61±1.90	8.73±1.92	10.79±2.65	0.400
C18:2n-6*c*	15.39±1.66^{Bb}	22.14±1.96^{Aa}	18.68±3.47^{Bb}	15.39±1.66^{Bb}	0.002
C20:4n-6	5.02±1.89^{b}	9.35±2.06^{a}	7.45±2.38^{ab}	5.03±1.89^{b}	0.030
C20:5n-3	1.44±0.42^{Aa}	0.00±0.00^{Bb}	0.00±0.00^{Bb}	1.44±0.42^{Aa}	<0.001

C22:6n-3	2.23±0.61^{Aa}	0.00±0.00^{Bb}	1.54±0.59^{Aa}	1.53±0.57^{Aa}	0.005
SFA	65.14±2.89	57.01±3.34	62.32±7.15	64.18±3.54	0.050
MUFA	12.57±2.79^{a}	11.10±1.57^{ab}	10.01±1.30^{b}	12.43±1.66^{a}	0.047
PUFA	22.29±4.89^{b}	31.89±3.14^{a}	27.67±6.56^{ab}	23.39±3.46^{b}	0.020
n-3 PUFA	3.19±0.37^{Aa}	0.00±0.00^{Cc}	1.54±1.13^{Bb}	2.97±0.58^{Aa}	0.005
n-6 PUFA	19.10±4.47^{Bb}	31.89±3.14^{Aa}	26.13±5.57^{Aa}	20.42±2.93^{Bb}	0.003

2.3 饲粮n-6/n-3 PUFA比值对冬毛期北极狐肝脏*L-FABP*和*FATP*基因表达的影响

由图1可知，随饲粮n-6/n-3 PUFA比值的升高，肝脏*L-FABP* mRNA相对表达量呈先升高再降低的趋势，其中以III组的相对表达量最高，但4组间差异不显著（*P*>0.05）。

由图2可知，随着饲粮n-6/n-3 PUFA比值的升高，肝脏*FATP* mRNA相对表达量呈先降低再升高的趋势，Ⅰ和Ⅳ组极显著高于Ⅱ和Ⅲ组（*P*<0.01），但Ⅰ和Ⅳ组间差异不显著（*P*>0.05），Ⅱ和Ⅲ组间差异不显著（*P*>0.05）。

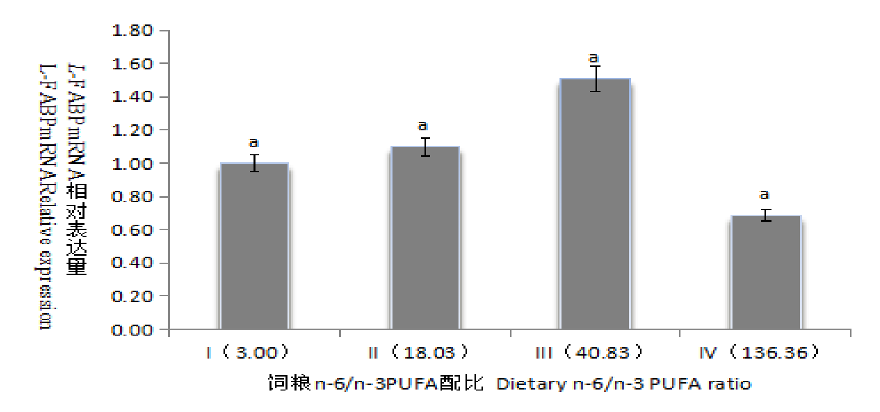


图 1 饲粮 n-6/n-3 PUFA 比值对冬毛期北极狐肝脏 *L-FABP* mRNA 相对表达量的影响

Fig.1 Effects of dietary n-6/n-3 PUFA ratio on liver *L-FABP* mRNA relative expression level of Arctic foxes during the winter fur-growing period

数据柱形标注不同大写字母表示差异极显著（*P*<0.01），不同小写字母表示差异显著（*P*<0.05），相同字母表示差异不显著（*P*>0.05）。图 2 同。

Date columns with different capital letter superscripts mean extremely significant difference (*P*<0.01), and with different small letter superscripts mean significant difference (*P*<0.05), while with the same letter superscripts mean no significant difference (*P*>0.05).. The same as Fig.2.

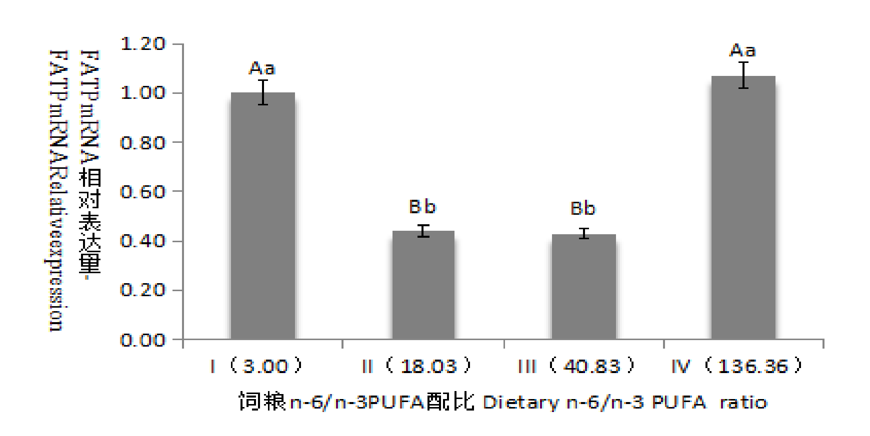


图 2　饲粮 n-6/n-3 PUFA 比值对冬毛期北极狐肝脏 *FATP* mRNA 相对表达量的影响

Fig.2　Effects of dietary n-6/n-3 PUFA ratio on liver *FATP* mRNA relative expression level of Arctic foxes during the winter fur-growing period

3　讨　论

3.1　饲粮 n-6/n-3 PUFA 比值对冬毛期北极狐生长性能的影响

研究发现鱼油富含n-3 PUFA，除能提高家禽免疫力之外，其促生长作用也已被许多研究者证实[16-17]。郭志有[18]研究发现，鱼油替代一定比例的玉米油可以增强肠道免疫应答，提高机体免疫力，从而提高仔猪的F/G。本试验中，从生长性能指标分析，Ⅳ和Ⅰ组的ADFI、ADG均高于Ⅱ和Ⅲ组，F/G均低于Ⅱ和Ⅲ组，表明鱼油和植物油脂混合要优于植物油脂间混合。这与在肉鸡上的研究结果[19]相一致，即动、植物油脂混合添加效果优于单独添加，不同的油脂按一定比例混合使用可发挥脂肪酸互补效应，更有利于脂肪的消化和利用，从而改善肉鸡生产性能。Ⅲ和Ⅳ组油脂配比虽然差别不大，但Ⅳ组生长性能优于Ⅲ组，这可能是由于饲粮n-6/n-3 PUFA比值不同导致的。研究表明，当饲粮总脂肪含量一定而n-6和n-3 PUFA含量不同，即饲粮中n-6/n-3 PUFA比值不同时，断奶仔猪的生产性能不同，适当比值的n-6/n-3 PUFA通过提高仔猪的免疫机能提高其生产性能[20]。饲粮n-6/n-3 PUFA比值通过影响动物机体代谢，改善动物饲粮消化水平，从而影响动物的生产性能[21]。

3.2　饲粮n-6/n-3 PUFA比例对冬毛期北极狐肝脏脂肪酸组成的影响

本试验测定发现，北极狐肝脏脂肪酸中SFA约占总脂肪酸的62%，MUFA约占总脂肪酸的12%，PUFA约总脂肪酸的占26%，说明在北极狐肝脏中脂肪酸主要以饱和形式沉积，这与Rouvinen等[11]的研究报道相一致。研究表明畜禽产品中的脂肪酸组成可能受到饲粮中脂肪酸组成的影响[22-23]，本试验中北极狐肝脏脂肪酸中MUFA、PUFA、n-3 PUFA和n-6 PUFA含

量的变化规律基本与饲粮中变化规律相同，即随n-6/n-3 PUFA比值的升高，MUFA和n-3 PUFA的含量呈先降低后升高趋势，PUFA和n-6 PUFA的含量呈先升高后降低趋势，这与Gudbjarnason等[24]的研究报道一致，说明饲粮n-6/n-3 PUFA比值影响着肝脏中n-6和n-3 PUFA的含量。本试验中，Ⅰ和Ⅳ组饲粮均含鱼油，在肝脏中沉积的n-3 PUFA量也最高，研究表明鱼油能降低合成C20:4n-6和C18:2n-6的Δ-6去饱和酶、延伸酶和Δ-5去饱和酶的活性[25]，这些酶主要是调控合成n-6 PUFA。Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ组饲粮含有丰富的n-6 PUFA，在肝脏中沉积的n-6 PUFA量也高于Ⅰ组。

3.3 饲粮n-6/n-3 PUFA比值对冬毛期北极狐*L-FABP*和*FATP*基因表达的影响

体外研究表明L-FABP与FATP对长链（>C14）脂肪酸具有高度亲和性，在脂肪酸摄取及转运等方面具有重要调控作用[26-28]。L-FABP与不饱和脂肪酸具有高度亲和性[29]，本试验中Ⅲ组北极狐肝脏*L-FABP* mRNA相对表达量最高，可能由于Ⅲ组饲粮不饱和脂肪酸含量相对高于其他组饲粮，北极狐摄入的较高含量的长链不饱和脂肪酸经肠道消化转运至肝脏，促进了*L-FABP*基因的表达[9]。Ⅰ和Ⅳ组北极狐肝脏*FATP* mRNA相对表达量显著高于Ⅱ和Ⅲ组，说明Ⅰ和Ⅳ组肝脏中*FATP*基因转运脂肪酸的效率高于Ⅱ和Ⅲ组，更有利于机体对脂肪酸的利用，促进北极狐的生长，这可从北极狐的生长性能结果上得到证实。近些年，随着对*FABPs*和*FATPs*基因研究的不断深入，其在北极狐脂肪代谢方面的调控机制还有待进一步研究。

4 结 论

综合分析本试验结果得出，饲粮添加 1.50%鱼油与 12.50%玉米油的混合油脂，即饲粮n-6/n-3 PUFA 比值为 136.36 时，上调了肝脏中 *FATP* 基因的表达，增加了肝脏长链脂肪酸的转运及利用效率，促进了冬毛期北极狐的生长。

参考文献：

[1] 喻礼怀.饲粮脂肪酸 ω-6/ω-3 对鹅脂肪代谢影响及其分子机制的研究[D].博士学位论文.扬州:扬州大学,2012:7–21.

[2] 高巧仙,宋代军,靳露.饲粮 n-6/n-3 多不饱和脂肪酸比例对畜禽健康和产品品质的影响[J].动物营养学报,2013,25(7):1429–1436.

[3] LARSSON S C,KUMLIN M,INGELMAN-SUNDBERG M,et al.Dietary long-chain n-3 fatty

acids for the prevention of cancer:a review of potential mechanisms[J].The American Journal of Clinical Nutrition,2004,79(6):935–945.

[4] 王远孝,张莉莉,王恬.不同油脂配比对黄羽肉鸡生产性能、屠宰性能和器官指数的影响[J].粮食与饲料工业,2010(2):42–45,52.

[5] SANZ M,LOPEZ-BOTE C J,MENOYO D,et al.Abdominal fat deposition and fatty acid synthesis are lower and β-oxidation is higher in broiler chickens fed diets containing unsaturated rather than saturated fat[J].The Journal Nutrition,2000,130(12):3034–3037.

[6] 于会民,李德发,管武太,等.不同脂肪对肉鸡营养素沉积、体组成和血清代谢物的影响[J].畜牧兽医学报,1998,29(4):304–314.

[7] 周萌,曹俊明,梁海鸥,等.饲料 n-3/n-6 脂肪酸比值对军曹鱼生长及鱼体组织脂肪酸组成的影响[J].广东农业科学,2006(12):77–81.

[8] ROUVINEN K.Dietary effects of omega-3 polyunsaturated fatty acids on body fat composition and health status of farm-raised blue and silver foxes[J].Acta Agriculturae Scandinavica,1991,41(4):401–414.

[9] 张婷,罗婧,钟伟,等.饲粮脂肪水平对冬毛期银狐能量代谢、血清生化指标、肝脏脂肪酸组成及肝脏型脂肪酸结合蛋白基因表达的影响[J].动物营养学报,2016,28(2):618–626.

[10] KÄKELÄ R,PÖLÖNEN I,MIETTINEN M,et al.Effects of different fat supplements on growth and hepatic lipids and fatty acids in male mink[J].Acta Agriculturae Scandinavica,Section A：Animal Science,2001,51(4):217–223.

[11] ROUVINEN K,KIISKINEN T.Influence of dietary fat source on the body fat composition of mink (*Mustela vison*) and blue fox (*Alopex lagopus*)[J].Acta Agriculturae Scandinavica,1989,39(3):279–288.

[12] VRICHIERI G V,OGATA R T,ZIMMERMAN A W,et al.Fatty acid binding proteins from different tissues show distinct patterns of fatty acid interactions[J].Biochemistry,2000,39(24):7197–7204.

[13] RICHIERI G V,OGATA R T,KLEINFELD A M.Equilibrium constants for the binding of fatty acids with fatty acid-binding proteins from adipocyte,intestine,heart,and liver measured with the

fluorescent probe ADIFAB[J].The Journal of Biological Chemistry,1994,269(30):23918–23930.

[14] 耿业业.育成期蓝狐脂肪消化代谢规律的研究[D].博士学位论文.北京:中国农业科学院,2011:28–29.

[15] FEDIAF.Nutritional guidelines for complete and complementary pet food for cats and dogs[S].Bruxelles：European Pet Food Industry Federation,2011,8:14.

[16] 夏中生.饲粮中不同油脂对生长鸡组织脂质含量及其脂肪酸组成的影响[J].广西农业大学学报,1998,17(4):323–332.

[17] FRITSCHE K L,CASSITY N A,HUANG S C.Effect of dietary fat source on antibody production and lymphocyte proliferation in chickens[J].Poultry Science,1991,70(3):611–617.

[18] 郭志有.多不饱和脂肪酸配比调控荣昌仔猪免疫应激的研究[D].硕士学位论文.重庆:西南大学,2011:25–41.

[19] 安文俊.日粮中添加不同配比油脂对肉鸡生产性能、肉品质及脂肪代谢影响的研究[D].硕士学位论文.南京:南京农业大学,2010:33–47.

[20] 左磊,李藏兰,赖长华.不同 n-6/n-3 多不饱和脂肪酸比值对断奶仔猪生长性能和免疫反应的影响[J].中国畜牧杂志,2010,46(23):48–50.

[21] 沈曼曼.ω-6、ω-3 多不饱和脂肪酸及其比值对畜禽影响的研究进展[J].广东饲料,2012,21(12):32–35.

[22] SHANG X G,WANG F L,LI D F,et al.Effect of dietary conjugated linoleic acid on the fatty acid composition of egg yolk,plasma and liver as well as hepatic stearoyl-coenzyme A desaturase activity and gene expression in laying hens[J].Poultry Science,2005,84(12):1886–1892.

[23] GATLIN L A,SEE M T,HANSEN J A.The effects of dietary fat sources,levels,and feeding intervals on pork fatty acid composition[J].Journal of Animal Science,2002,80(6):1606–1615.

[24] GUDBJARNASON S,OSKARSDOTTIR G.Modification of fatty acid composition of rat heart lipids by feeding cod liver oil[J].Biochimica et Biophysica Acta:Lipids and Lipid Metabolism,1977,487(1):10–15.

[25] KINSELLA J E.Seafoods and fish oils in human health and disease[M].New York：Marcel Dekker,1987:317.

[26] MATZINGER D,DEGEN L,DREWE J,et al.The role of long chain fatty acids in regulating food intake and cholecystokinin release in humans[J].Gut,2000,46(5):688–694.

[27] HIRSCH D,STAHL A,LODISH H F.A family of fatty acid transporters conserved from mycobacterium to man[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,1998,95(15):8625–8629.

[28] STORCH J,THUMSER A E A.The fatty acid transport function of fatty acid-binding proteins[J].Biochimica et Biophysica Acta:Molecular and Cell Biology of Lipids,2000,1486(1):28–44.

[31] LOWE J B,SACCHETTINI J C,LAPOSATA M,et al.Expression of rat intestinal fatty acid-binding protein in *Escherichia coli*.Purification and comparison of ligand binding characteristics with that of *Escherichia coli*-derived rat liver fatty acid-binding protein[J].The Journal of Biological Chemistry,1987,262(12):5931–5937.

Effects of Dietary n-6/n-3 Polyunsaturated Fatty Acids Ratio on Growth Performance and Related Protein Gene Expression of Liver Fatty Acid Metabolism of Arctic Foxes During the Winter Fur-Growing Period

ZHONG Wei ZHANG Ting LUO Jing YUE Zhigang LIU Xueqing FAN Yanyan SUN Haoran SUN Xuyang LI Guangyu*

(*State Key Laboratory of Special Economic Animal Molecular Biology, Institute of Special Animal and Plant Science, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Changchun* 130112, *China*)

Abstract: This experiment was conducted to study the effects of dietary n-6/n-3 polyunsaturated fatty acids（PUFA）ratio on growth performance, liver fatty acid composition and liver-type fatty acid binding protein （*L-FABP*） and fatty acid transport protein （*FATP*） gene expression of Arctic foxes during the winter fur-growing period. Forty-eight 157-day-old male Arctic foxes with the average body weight of （5 658±47） g were randomly divided into 4 groups with 12 replicates per group and 1 fox per replicate, and they were fed experimental diets containing 12.00% fish oil and 2.00% soybean oil (group Ⅰ), 9.38% corn oil and 4.62% soybean oil (group Ⅱ), 12.00% corn oil and 2.00% soybean oil (group Ⅲ), 1.50% fish oil and 12.50% corn oil

(group Ⅳ) with the n-6/n-3 PUFA ratios were 3.00, 18.03, 40.83 and 136.36, respectively. The oil composition and proportion of diets among groups were different, but the other ingredients were consistent. The experiment was 7 days for adaption and 40 days for trial period. The results showed as follows: 1) dietary n-6/n-3 PUFA ratio extremely significantly affected average daily gain （ADG), average daily feed intake (ADFI) and the ratio of feed to gain (F/G) of Arctic foxes during the winter fur-growing period (*P*<0.01). The ADG in groups Ⅰ and Ⅳ was extremely significantly higher than that in groups Ⅱ and Ⅲ (*P*<0.01), the ADFI in groups Ⅰ, Ⅱ and Ⅳ was extremely significantly higher than that in group Ⅲ (*P*<0.01), the F/G in group Ⅳ was extremely significantly lower than that in groups Ⅱ and Ⅲ (*P*<0.01). 2) Dietary n-6/n-3 PUFA ratio extremely significantly or significantly affected liver monounsaturated fatty acids (MUFA), PUFA, n-6 PUFA and n-3 PUFA contents of Arctic foxes during the winter fur-growing period (*P*<0.01 or *P*<0.05), but had no significant difference in liver saturated fatty acids (SFA) content (*P*>0.05). The liver n-3 PUFA content in groups Ⅰ and Ⅳ was extremely significantly higher than that in groups Ⅱ and Ⅲ (*P*<0.01), while the liver n-6 PUFA content in groups Ⅱ and Ⅲ was extremely significantly higher than that in groups Ⅰ and Ⅳ (*P*<0.01). 3) Dietary n-6/n-3 PUFA ratio did not significantly affect liver *L-FABP* mRNA expression level of Arctic foxes during the winter fur-growing period (*P*>0.05), but extremely significantly affected liver *FATP* mRNA expression level (*P*<0.01). The *FATP* mRNA expression level in groups Ⅰ and Ⅳ was extremely significantly higher than that in groups Ⅱ and Ⅲ (*P*<0.01). In conclusion, when the ratio of n-6/n-3 PUFA is 136.36 (adding mixed oils of 1.50% fish oil+12.50% corn oil in the diets), it raises the expression of liver *FATP* gene, promotes the transportation and utilization efficiency of fatty acids, and improve the growth of Arctic foxes during the winter fur-growing period.

Key words: n-6/n-3 PUFA; Arctic fox; liver; fatty acids; liver-type fatty acid binding protein; fatty acid transport protein

---

*Corresponding author, professor, E-mail: tcslgy@126.com (责任编辑 菅景颖)